

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SECADOR SOLAR MIXTO CON ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

**Janella Lezcano^{1*}, Tania Delgado¹, Apolinar Picado²,
Rodolfo Espinosa²**

¹Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Avenida
Universitaria, Managua 11127, Nicaragua

²Núcleo de Ingenieros Químicos de Nicaragua (NIQN), Managua 11162, Nicaragua

*jani1996li@hotmail.com

RESUMEN

Se evaluó experimentalmente un secador solar mixto con material de cambio de fase para el almacenamiento de energía térmica. Se operó el secador de forma continua durante las 24 horas, por un periodo de 6 días, utilizando granos de frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.) con una humedad inicial de 28% (base húmeda) a partir del segundo día. Durante la exposición, se registraron, en intervalos de 3 minutos, la temperatura ambiente, velocidad del aire a la entrada del colector solar de doble flujo, temperatura de la parafina, así como la temperatura del aire en diversos puntos del colector. Adicionalmente, cada 30 minutos, se registró la energía solar total incidente sobre el piso por unidad de área, radiación solar, empleando un medidor de energía solar. Los resultados muestran que la eficiencia instantánea del colector solar presentó valores promedios de 24.3% a 35.9%, mientras que la eficiencia térmica diaria del almacenamiento promedió entre 61.9% y 67.1%, demostrando la capacidad del sistema de liberar energía térmica en ausencia de radiación solar directa. Durante la operación, el secador logró reducir la humedad de los granos de frijol rojo hasta alrededor del 11% (base húmeda) en 3 días. La eficiencia térmica diaria del secador alcanzó aproximadamente el 6.5%, la cual es comparable con lo reportado en la literatura para secadores solares sin aislamiento térmico ni control de flujo de aire. La higroscopicidad de los granos de frijol rojo y la presencia de fluctuaciones en la radiación solar contribuyó a la eficiencia observada.

Palabras clave: Secador solar mixto, colector solar de aire de doble flujo, material de cambio de fase, eficiencia térmica.

1. INTRODUCCIÓN

El secado de alimentos, como frutas, verduras y granos básicos, es una de las aplicaciones más utilizadas de la energía solar. Al reducir el contenido de humedad de los alimentos a un nivel seguro de almacenamiento, el secado previene el crecimiento de microorganismos y por consecuencia prolonga su vida útil. Se han desarrollado numerosos métodos de secado, incluyendo secadores solares directos, indirectos, mixtos e híbridos. Sin embargo, la intermitencia y la incertidumbre en la disponibilidad de la radiación solar siguen siendo preocupaciones asociadas con estos tipos de secadores solares. Estas preocupaciones afectan su fiabilidad y, por lo tanto, limitan su aplicación. Para superar estos desafíos, generalmente se incorporan a los secadores solares fuentes de calor auxiliares (e.g., calentadores eléctricos, estufas de biomasa). Además, los secadores solares pueden incorporar un módulo de almacenamiento de energía térmica para cubrir las necesidades de calor durante periodos de nubosidad o de radiación solar insuficiente [1].

Generalmente, en los secadores solares se utilizan dos tipos de módulos de almacenamiento de energía térmica, tales como almacenamiento de calor sensible y almacenamiento de calor latente. En el almacenamiento de calor sensible, la temperatura de los materiales de almacenamiento (e.g., concreto, arena, hormigón) se eleva para almacenar la energía térmica. Mientras que, en el almacenamiento de calor latente, se utilizan materiales de cambio de fase (e.g., parafina, sales de nitrato). La energía térmica se almacena mediante la transición de fase del material de almacenamiento de sólido a líquido [2]. La aplicación del almacenamiento de calor latente ha recibido mucha atención de investigación debido a las numerosas ventajas asociadas, como la alta capacidad de almacenamiento de energía, la disipación de la energía a una temperatura casi constante y la baja relación volumen-masa [3].

El objetivo del presente trabajo fue la evaluación experimental de un secador mixto compuesto de un colector solar de doble flujo acoplado con un módulo de almacenamiento de energía térmica (i.e., calor latente) que utiliza parafina como material de cambio de fase. La evaluación se basó en la determinación experimental de la eficiencia instantánea del colector solar, la eficiencia del módulo de almacenamiento y la eficiencia del secador. El material de estudio fue frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.), el cual es el segundo alimento básico esencial en Nicaragua, después del maíz (*Zea mays* L.).

2. METODOLOGÍA

El secador solar mixto experimental empleado consiste en tres componentes principales: colector solar, módulo de almacenamiento térmico y cámara de secado. En este secador, el módulo de almacenamiento térmico es parte integrante del colector solar, cumpliendo la doble función de absorbedor de la radiación solar y contenedor de la parafina. En el colector solar de doble flujo el aire circula por encima y por debajo del absorbedor-contenedor. Tiene cubierta de vidrio flotado transparente de 5 mm, con un área de apertura de 2 m² y pasaje de aire de 0.06 m. En su parte inferior y laterales esta aislado con poliestireno expandido y lámina reflectiva. El absorbedor-contenedor de forma rectangular fue construido con láminas lisas de hierro. En sus caras superior e inferior cuenta con aletas transversales y deflectores longitudinales, ambos de hierro, los cuales modifican la trayectoria del gas, aumentando el tiempo de contacto, y generan turbulencias, mejorando la transferencia de calor. Aloja 49.4 kg de parafina con rango de fusión 52°C a 63°C. Por su parte, la cámara de secado tiene la pared sur de vidrio. Su base, paredes laterales y puertas están aisladas con los mismos materiales utilizados en el colector solar, para reducir las pérdidas térmicas tanto diurnas como nocturnas. En la parte superior de la cámara hay un ventilador de tipo turbina movido por el viento (extractor). El interior de la cámara permite utilizar diferentes soportes de producto (e.g. bandejas, cajones o varillas) a distancias variables. [4]

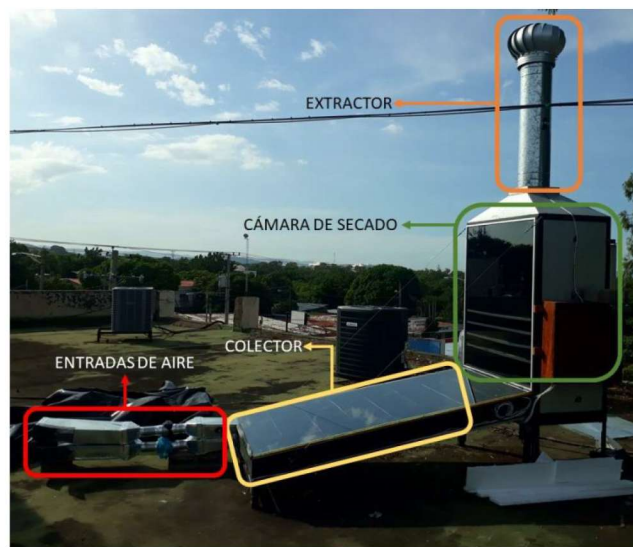


Figura 1. Secador solar mixto experimental [4].

El secador se expuso a la radiación solar de forma continua por un período de seis días. La eficiencia instantánea del colector solar se determinó con los datos recolectados durante el día. En el caso de la eficiencia del módulo de almacenamiento de energía térmica, se requirieron datos de al menos de un día con su noche. La determinación de estas dos eficiencias se puede realizar sin o con producto en la cámara de secado. En cambio, la eficiencia del secador solar se evaluó secando los granos de frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.) a partir del segundo día, utilizando datos obtenidos durante el día y la noche. Durante el tiempo de exposición, se registraron, en intervalos de 3 minutos, la temperatura ambiente, velocidad del aire a la entrada del colector solar, así como la temperatura del aire en diversos puntos dentro del colector solar. Adicionalmente, cada 30 minutos se registró la energía solar total incidente sobre el piso por unidad de área, radiación solar, empleando un medidor de energía solar Dr. Meter®, modelo SM206, resolución 0.01 W/m², precisión ±5%. La eficiencia instantánea del colector solar se calculó mediante la siguiente ecuación [4]:

$$\eta_c = \frac{\int_{t_0}^{t_f} \dot{Q}_{aire}(t) dt}{A_c \int_{t_0}^{t_f} G_{solar}(t) dt} \quad (1)$$

donde t_0 y t_f son los tiempos inicial y final del intervalo para el cual se calcula la eficiencia, $\dot{Q}_{aire}$ es el calor transferido al aire y G_{solar} es la radiación solar. La eficiencia del módulo de almacenamiento de energía térmica se calculó usando la ecuación:

$$\eta_{sist} = \frac{Q_d}{Q_{ch}} \quad (2)$$

donde Q_d es la energía cedida por el material de cambio de fase durante su proceso de descarga y Q_{ch} es la energía recibida durante su proceso de carga. Las temperaturas al inicio y final del período de descarga se establecieron por medio de una gráfica de temperatura de la parafina con respecto al tiempo. Para resolver las integrales en las ecuaciones (1)-(2), se evaluaron en periodos de tiempo seleccionados y utilizando los datos registrados de temperatura y velocidad del aire, así como de radiación solar. Los periodos de tiempo se seleccionaron analizando los gráficos de flujo de calor para cada lado del colector solar, así como de radiación solar como función del tiempo.

La eficiencia térmica del secador solar se evaluó realizando experimentos de secado con frijol rojo. Este grano básico es de fácil adquisición en Nicaragua y de bajo costo; además de ser higroscópico y no sufre cambios estructurales durante el proceso de humidificación y secado. Se adquirieron 14 kg de frijol rojo con una humedad de 16% (base húmeda) y luego se sumergieron en agua durante una hora y media, alcanzando una humedad del 28% (base húmeda). Los granos humidificados se pesaron y luego se distribuyeron en tres bandejas de fondo liso, las cuales fueron colocadas en la cámara de secado una sobre la otra con una separación de 10 cm. Adicionalmente, 10 cm por encima de la bandeja superior se colocó una lámina de zinc liso a manera de deflector. Con este arreglo de bandejas se lograba que aire fluyera en paralelo al lecho del grano. El experimento de secado se desarrolló durante tres días; en los cuales en la mañana y al atardecer se tomaron muestras de granos de cada bandeja para medir su humedad. Los granos utilizados fueron reincorporados a su respectiva bandeja luego de efectuada la medición. Al finalizar el experimento se retiraron los granos de las bandejas y se pesaron juntos. La humedad del frijol rojo se midió con un analizador de humedad de granos agrícolas Sinar™, modelo 6060AP, versión 7.1 2006, rango de medición de 1% a 35% en base húmeda; resolución 0.1% y desviación estándar 0.3%. Con los datos obtenidos durante los experimentos se construyeron gráficas de las propiedades del aire a su paso por el colector solar y la cámara de secado, de la parafina, de las superficies del colector solar, así como la radiación solar en función del tiempo. Además, se calcularon la eficiencia del secador y la eficiencia de recolección, así como la reabsorción nocturna. La eficiencia térmica del secador solar se calculó mediante la ecuación:

$$\eta_s = \frac{m_w \Delta H_v}{E_s} \quad (3)$$

donde m_w es la masa de agua removida del producto, ΔH_v es el calor latente de vaporización del agua y E_s es la energía total suministrada al secador. La eficiencia de recolección se define como la razón de la humedad captada por el aire en la cámara de secado y la capacidad teórica del aire para absorber la humedad:

$$\eta_p = \frac{Y_s - Y_e}{Y^* - Y_e} \quad (4)$$

donde Y_e y Y_s son los valores de humedad absoluta del aire a la entrada y salida de la cámara respectivamente; y Y^* es la humedad de saturación adiabática del aire a las condiciones de entrada a la cámara de secado. La reabsorción nocturna para los secadores solares con material de cambio de fase se calculó utilizando la ecuación:

$$R_n = \frac{X_m - X_t}{X_t} \quad (5)$$

donde X_m es el contenido de humedad del producto al amanecer y X_t el contenido de humedad del producto al ocaso. Los valores positivos de R_n indican reabsorción de humedad. En cambio, los valores negativos muestran pérdida de humedad [4].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Eficiencia instantánea del colector solar

Los cálculos se realizaron con datos recolectados cada tres minutos. Aunque se recopilaban datos durante seis días, solo se incluyeron cuatro en el análisis: el día 1 se descartó porque las mediciones comenzaron en la tarde, y el día 6 porque finalizaron antes de completar el ciclo diario, lo cual limitaba la validez del análisis comparativo. La eficiencia mostró una marcada

San Luis Potosí, SLP., México del 10 al 14 de noviembre del 2025

dependencia con la radiación solar, alcanzando su valor máximo alrededor del mediodía. La eficiencia mínima, cercana a cero, se observó durante las primeras y últimas horas del día, lo cual es consistente con la menor disponibilidad de radiación solar y la disminución del gradiente térmico entre el colector y el ambiente. Este comportamiento concuerda con lo observado en estudios previos [5]. En la Figura 2, se ilustra la eficiencia instantánea del colector solar con respecto al tiempo, que corresponde al día 4 (7 de mayo de 2020). Respecto a los valores de eficiencia obtenidos, el rango fue muy amplio entre los distintos días. La eficiencia mínima registrada fue del 0% y la máxima de 97.22%. A continuación, se presentan los valores mínimos, máximos y el promedio diario por cada uno de los cuatro días analizados:

- día 2, 5 de mayo: mínima 2.41%, máxima 80.89%, media diaria 46.56%
- día 3, 6 de mayo: mínima 0.72%, máxima 68.96%, media diaria 24.30%
- día 4, 7 de mayo: mínima 0.00%, máxima 93.42%, media diaria 28.93%
- día 5, 8 de mayo: mínima 1.00%, máxima 97.22%, media diaria 35.88%

Estas variaciones se explican por las condiciones de radiación solar de cada día, el comportamiento térmico del colector y las fluctuaciones en el flujo de aire. Por ejemplo, durante las mañanas y al final de la tarde, la radiación es baja, lo que reduce significativamente la eficiencia. Además, si la diferencia de temperatura entre la entrada y salida de aire es pequeña, como ocurre en condiciones de baja irradiancia, el calor útil transferido disminuye y la eficiencia disminuye.

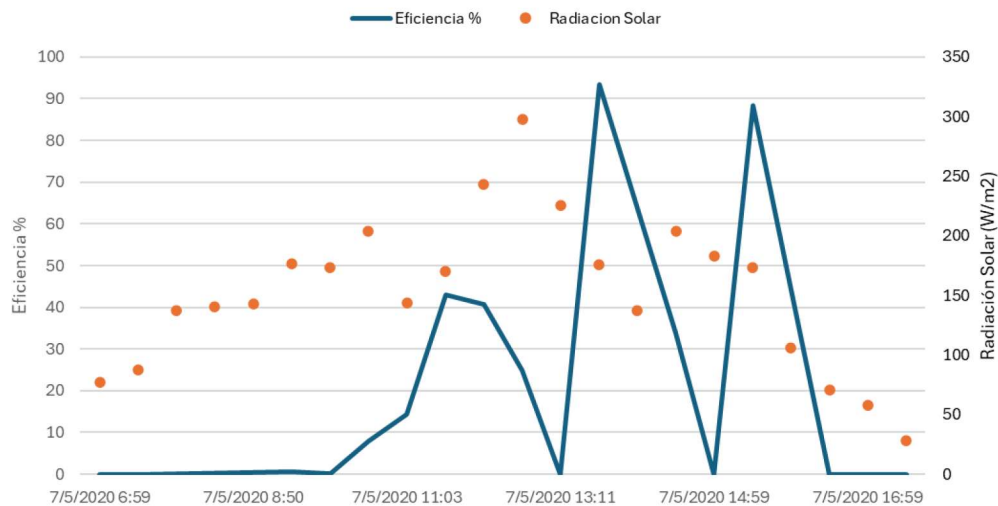


Figura 2. Eficiencia instantánea del colector solar vs. tiempo (día 4, 7 de mayo).

El análisis de las temperaturas del aire en distintos puntos del colector solar permitió observar un incremento progresivo durante las horas de mayor radiación. La temperatura del aire en la parte superior del colector fue significativamente mayor durante el día debido a la cubierta de vidrio, mientras que, durante la noche, la parte inferior presentó temperaturas superiores gracias al aislamiento térmico. Lo anterior sugiere una correlación directa entre la radiación solar y la temperatura del aire en colectores solares [6]. La Figura 3 permite identificar la evolución térmica del sistema en paralelo con la variación de la radiación solar a lo largo del día (día 4, 7 de mayo).

San Luis Potosí, SLP., México del 10 al 14 de noviembre del 2025

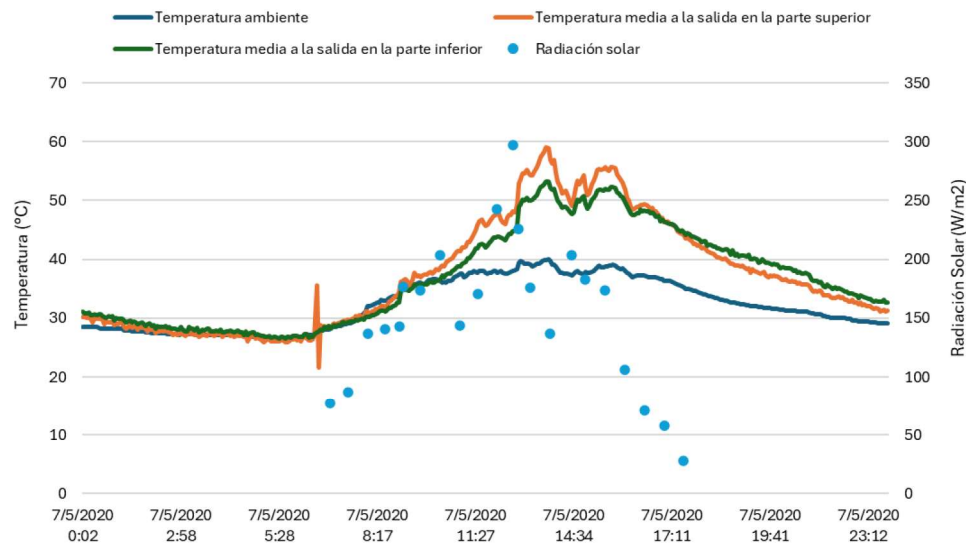


Figura 3. Radiación solar, temperatura ambiente y temperaturas del colector vs. tiempo (día 4, 7 de mayo).

3.2 Eficiencia del módulo de almacenamiento de energía térmica

Para el cálculo de esta eficiencia, se registró la temperatura de la parafina y la irradiación solar en intervalos regulares. Solo se consideraron los días 6, 7 y 8 de mayo. La eficiencia más alta se obtuvo el 7 de mayo con un 84.9%, mientras que el 6 y 8 de mayo presentaron valores de 61.9% y 67.1% respectivamente. Estos resultados superan considerablemente el valor promedio de 33.9% reportado en la literatura [7] en condiciones sin carga. Esta diferencia puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, en el presente estudio no se consideraron pérdidas térmicas por conducción ni convección durante los procesos de carga y descarga. Asimismo, la energía solar incidente (Q_{ch}) se estimó mediante una integración numérica de la irradiancia medida a intervalos variables, sin aplicar factores de eficiencia óptica o térmica. Esto, en conjunto, puede haber sobreestimado la energía aprovechada y explicar los valores más elevados obtenidos. Por lo tanto, la alta eficiencia observada en este caso debe interpretarse con cautela y principalmente como una aproximación útil bajo condiciones ideales de operación.

La evolución térmica de la parafina durante los días de estudio se muestra en la Figura 4. Se observó un incremento sostenido de la temperatura durante el día, alcanzando un valor máximo de 73.6 °C el día 4, 7 de mayo, seguido de una disminución nocturna hasta 36.1 °C. Este comportamiento evidencia un ciclo completo de carga y descarga. El día 5, 8 de mayo, presentó el mayor tiempo de descarga (más de 16 horas), aunque con una eficiencia intermedia. Los resultados muestran que la eficiencia del almacenamiento no depende únicamente de la cantidad de radiación solar, sino también de su estabilidad, la duración del ciclo térmico y la operación del módulo dentro del rango de fusión de la parafina. El comportamiento observado confirma la capacidad del sistema para almacenar y liberar energía térmica, en línea con estudios previos, aunque influido por factores como el diseño del contenedor.

San Luis Potosí, SLP., México del 10 al 14 de noviembre del 2025

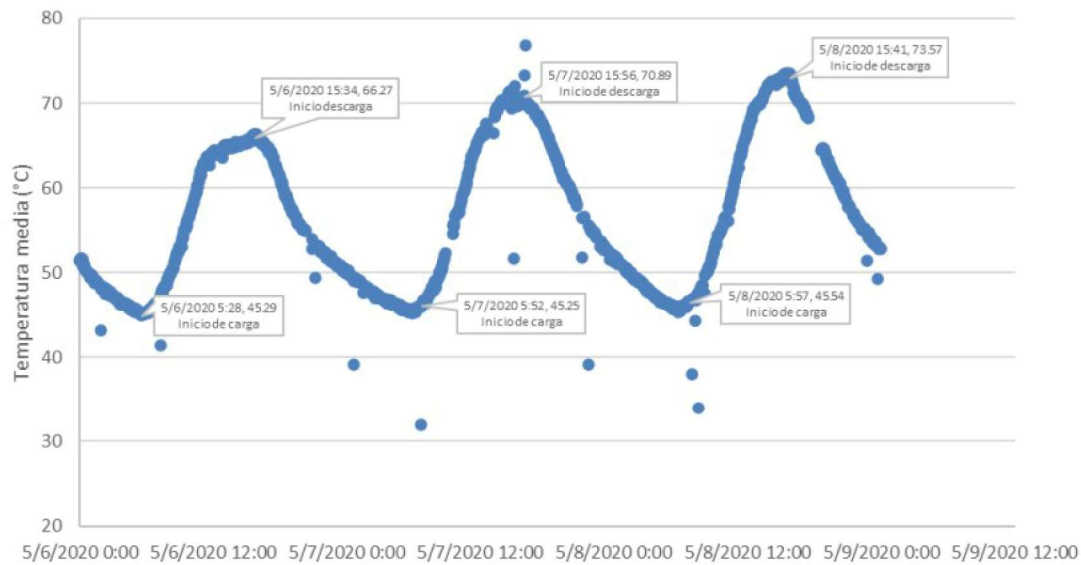


Figura 4. Temperatura media de la parafina vs. tiempo.

3.3 Eficiencia térmica del secador solar

La evaluación térmica se realizó mediante el análisis del comportamiento del proceso de secado de frijol, considerando variables como la humedad del producto, la radiación solar incidente y la eficiencia térmica obtenida. Aunque se registraron datos desde el 5 hasta el 9 de mayo, se seleccionaron únicamente los días 6, 7 y 8 de mayo para el análisis comparativo, ya que presentaban series completas de datos desde el inicio hasta el final del día. Los valores obtenidos de eficiencia fueron del 4.1% el 6 de mayo, 5.9% el 7 de mayo y 6.3% el 8 de mayo. Estas eficiencias, aunque moderadas, son coherentes con lo reportado para sistemas de secado solar sin aislamiento térmico ni control de flujo de aire. Adicionalmente, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango inferior reportado para sistemas con ventilación natural, sin asistencia energética ni aislamiento térmico. La higroscopicidad del frijol rojo y la presencia de fluctuaciones en la radiación solar también contribuyen a explicar las eficiencias observadas.

Los resultados indican que el valor más alto de masa de agua removida diariamente fue el 8 de mayo con 0.239 kg, seguido del 7 de mayo (0.210 kg) y el 6 de mayo (0.141 kg). Este incremento es coherente con la disponibilidad de radiación solar en esos días. Adicionalmente, la evolución de la humedad del frijol rojo durante los experimentos de secado muestra una reducción progresiva desde valores iniciales cercanos al 19% hasta mínimos de aproximadamente 11%, lo cual valida la efectividad del secador solar. El valor máximo de energía diaria se alcanzó el 8 de mayo con 8540 kJ, mientras que el mínimo correspondió al 6 de mayo con 7821 kJ.

3.4 Eficiencia de recolección y reabsorción nocturna

Los resultados obtenidos mostraron que los promedios diarios de eficiencia de recolección variaron entre 0.24 y 0.37, alcanzándose el valor más alto el día 6 de mayo (0.37), mientras que el más bajo se registró el día 8 de mayo (0.24). Estos valores sugieren un comportamiento variable del secador a lo largo de los días, influenciado posiblemente por condiciones ambientales fluctuantes como la radiación solar incidente y la temperatura del aire ambiente. En cuanto a los valores máximos de eficiencia, se registraron picos de captación de humedad que alcanzaron hasta 0.60 (día 2 a las 3:46:59 AM), lo cual evidencia que, en ciertos momentos del día, el aire logró captar hasta el 60% de su capacidad máxima teórica de humedad. El valor máximo más bajo fue de 0.34 (día 3 a las 5:37:16 AM). Por otro lado, los valores mínimos de eficiencia se situaron en un rango de 0.07 a 0.11, con el más bajo registrado el día 1 a las 9:36:53 AM. Esto denota momentos de baja actividad de secado, probablemente relacionados con descensos en la temperatura del aire o baja diferencia de humedad entre el aire de entrada y salida.

Los resultados obtenidos mostraron valores positivos de eficiencia de reabsorción en todos los casos, con un rango entre 0.0124 y 0.2683, lo que indica que durante las noches de prueba se produjo una ligera reabsorción de humedad por parte del producto. Esta tendencia concuerda con lo reportado en la literatura [7], donde se observó reabsorción nocturna en secadores solares que empleaban materiales de almacenamiento térmico. Sin embargo, cabe destacar que las condiciones operativas difieren entre ambos estudios, especialmente en lo referente a la temperatura del aire durante la operación del sistema.

CONCLUSIONES

Se evaluó un secador solar mixto con un módulo de almacenamiento de energía térmica, que utiliza parafina como material de cambio de fase. Se operó el secador de forma continua durante las 24 horas por un periodo de seis días, utilizando granos de frijol rojo (*Phaseolus vulgaris* L.) con una humedad inicial de 28% (base húmeda) a partir del segundo día. Los resultados muestran que la eficiencia instantánea del colector solar presentó valores promedios de 24.3% a 35.9%, mientras que la eficiencia térmica diaria promedio del módulo de almacenamiento varió desde 61.9% a 67.1%, demostrando la capacidad del módulo de liberar energía térmica en ausencia de radiación solar directa. El secador logró reducir la humedad de los granos de frijol rojo hasta alrededor del 11% (base húmeda) en 3 días. La eficiencia térmica diaria del secador alcanzó aproximadamente el 6.5%. Además, la eficiencia de recolección del aire mostró un valor máximo de 0.37 y la reabsorción nocturna con valores cercanos a cero. Las eficiencias obtenidas se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para secador solares comparables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), por su apoyo económico, y en especial a los miembros del Programa de Ingeniería Química involucrados en la ejecución de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] D.T. Embiale and D.G. Gunjo, "Investigation on solar drying system with double pass solar air heater coupled with paraffin wax based latent heat storage: Experimental and numerical study", *Results Eng.*, vol. 20, 101561, Dec, 2023.
- [2] D.K. Rabha and P. Muthukumar, "Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system", *Sol. Energy*, vol. 149, pp. 214-226, Jun, 2017.
- [3] M.A. Shah and P.V. Ramana, "A comprehensive review on solar drying using paraffin wax as PCM", *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 17, no. 1, 012701, Jan, 2025.
- [4] T. Delgado and J. Lezcano, "Diseño de un secador solar mixto con material de cambio de fase para acumular energía térmica", Managua: Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), May, 2025.
- [5] A.G.M.B. Mustayen, S. Mekhilef, and R. Saidur, "Performance study of different solar dryers: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 463-470, Jun, 2014.
- [6] R. Bakari, R.J.A. Minja and K.N. Njau, "Effect of glass thickness on performance of flat plate solar collectors for fruits drying", *J. Energy*, vol. 2014, no. 1, 247287, Mar, 2014.
- [7] A. El Khadraoui, S. Bouadila, S. Kooli, A. Farhat and A. Guizani, "Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM", *J. Clean. Prod.*, vol. 18, pp. 37-48, Apr, 2017.